

Fluidtechnik



14th ISC

International Sealing Conference

Sealing Systems: Applications and Research

Internationale Dichtungstagung

Dichtsysteme in Anwendung und Forschung

Stuttgart, Germany
Oct. 10–11, 2006



iMA
UNI STUTTGART

Fluidtechnik



14th ISC

International Sealing Conference

Sealing Systems: Applications and Research

Internationale Dichtungstagung

Dichtsysteme in Anwendung und Forschung

Stuttgart, Germany
October 10–11, 2006

Reliable Sealing – Status quo and Vision

Zuverlässig abdichten – Status quo und Vision



Copyright VDMA, Fachverband Fluidtechnik, 2006

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in retrieval systems, or transmitted, in any form by any means without the prior permission of the publisher.

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne die vorherige Zustimmung des Herausgebers vervielfältigt, gespeichert oder übertragen werden.

Herstellung:
LEITHNER e. K.

FACHVERBAND FLUIDTECHNIK
IM VDMA e.V.
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main
Germany

Phone +49 69 6603–1318
Fax +49 69 6603–2318
E-Mail ralf.stemmjack@vdma.org
Internet www.vdma.org

ISBN 3-00-019913-6
ISBN 978-3-00-019913-4

Erweiterung der Einsatzgrenzen von PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille

Dipl.-Ing. Frank Bauer, Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas

Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart

1 Überblick

Häufig werden die zulässigen Betriebstemperaturen und Laufgeschwindigkeiten von Elastomer-Radialwellendichtringen (RWDR) überschritten. Immer öfter sollen elastomerunverträgliche Fluide abgedichtet werden. Dies führt zu undichten Systemen. Stattdessen können manschettenförmige PTFE-RWDR mit Spiralrille eingesetzt werden. Diese sind für eine Drehrichtung geeignet und sind bislang nur an bespritzten Dichtstellen, wie beispielsweise an Kurbelwellen verwendbar.

Die Spiralrillen und deren Funktionsweise waren bislang unzureichend untersucht und die Entwicklungen basierten auf empirischem Wissen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden die Dichtringe umfassend untersucht. Eine wichtige Untersuchung war die Analyse der Strömungsvorgänge unter der Dichtlippe und in den Rillen selbst.

Im Beitrag wird die Funktion im statischen und dynamischen Betrieb kurz vorgestellt. Auf diesem Wissen aufbauend werden optimierte Dichtringe und Dichtringe mit alternativer statischer Abdichtung vorgestellt, die eine Ausweitung des Einsatzbereiches im allgemeinen Maschinenbau an überfluteten Dichtstellen ermöglichen könnten.

2 Ausgangssituation

Zur Abdichtung von Betriebsfluiden an Wellendurchtrittstellen werden in allen Bereichen des Maschinen- und Fahrzeugbaus Elastomer-Radialwellendichtringe (RWDR) eingesetzt. Aufgrund seiner guten statischen Dichtheit und des aktiven, dynamischen Rückfördermechanismus ($1/1$ - $1/4$) hat er sich erfolgreich auf dem Markt durchgesetzt. Allerdings ist der Einsatzbereich von Elastomer-RWDR begrenzt. Zu hohe Be-

triebstemperaturen oder Laufgeschwindigkeiten oder unverträgliche Fluide führen zum Ausfall der Dichtsysteme.

Aus diesen Gründen werden neben den Elastomer-RWDR zunehmend Dichtmanschetten aus PTFE-Compounds eingesetzt. Diese sind thermisch (bis über 200°C) und chemisch universell beständig. PTFE-Manschetten verfügen, im Gegensatz zu Elastomer-RWDR, nicht über einen sich selbst ausbildenden Rückfördermechanismus und sind dadurch dynamisch nicht ohne zusätzliche Rückfördererelemente dicht (11, 12). Deshalb wurde die PTFE-Manschette mit Spiralrille (**Bild 1**) entwickelt. Die Spiralrille erzeugt, ähnlich wie in einer Gewindewellendichtung, eine gerichtete, drehrichtungsabhängige Pumpwirkung auf das unter der Dichtlippe befindliche Öl. Die Welle darf deshalb nur in einer Drehrichtung betrieben werden. Die berührenden Bereiche jedes Gewindegangs (convolution) der Rille (groove) werden Damm (land) genannt.

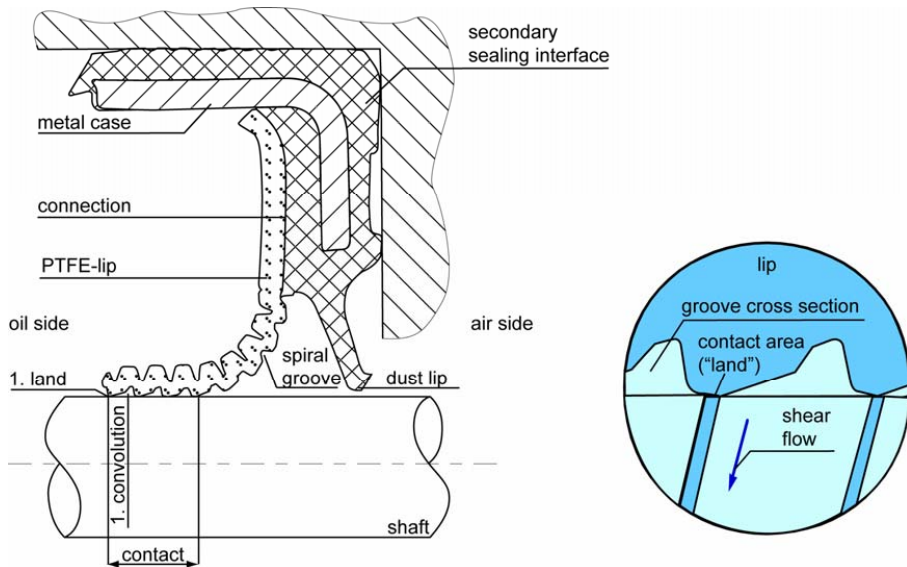


Bild 1: PTFE-Manschettdichtung

Figure 1: PTFE lip seal

Die statische Dichtheit ist kritisch zu beurteilen, da unter Umständen bei Stillstand der Welle Fluid durch die Spiralrille austreten kann. Die genaue Funktionsweise der dynamischen und statischen Dichtwirkung der PTFE-Manschette mit Spiralrille war bisher noch nicht ausreichend erforscht. Aus diesem Grund sind heute auf dem Markt befindliche Produkte größtenteils aus empirischen Entwicklungen entstanden.

Die Spiralrinne kann mit einem messerartigen Werkzeug geschnitten oder mit einem Formwerkzeug in die Dichtlippe geprägt werden. Beim Prägen ist das Einbringen von Dichtstegen (static sealing points, **Bild 2**) möglich. Diese sollen die Rinne an einer oder mehreren Stellen verschließen und somit statische Dichtheit der Fluide Öl und Luft gewährleisten. Eine gute Gasdichtheit ist aufgrund der Drucktests von Motoren und Aggregaten nach der Montage notwendig.

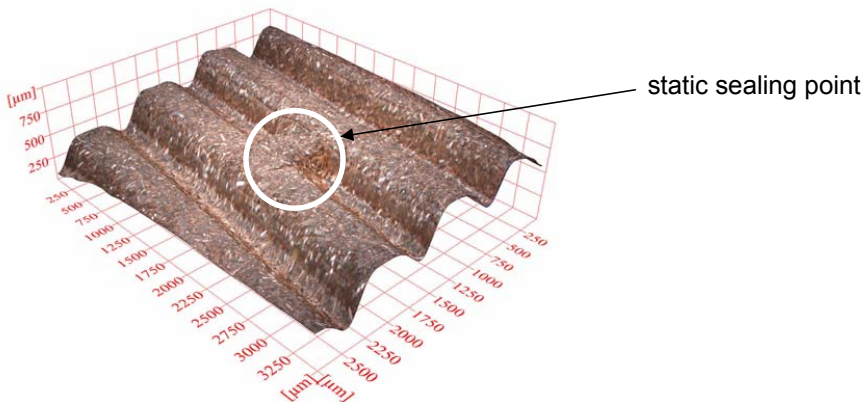


Bild 2: Dichtsteg im mittleren Gewindegang
 Figure 2: Static sealing point in the middle convolution

3 Strömungsprüfstand

Um die Strömungsvorgänge unter der Dichtlippe und in den Rillen beobachten und analysieren zu können, wurde ein spezieller Prüfstand aufgebaut (/6/, /7/, /8/). Hauptbestandteil des Strömungsprüfstands ist eine Glashohlwelle (**Bild 3**), die an einer angetriebenen Spindel montiert ist. Es sind Drehzahlen kleiner 0,5 U/min möglich. Koaxial zur Glashohlwelle ist die Dichtringaufnahme sowie ein axial verfahrbares Optiksystm montiert. In die Aufnahme werden drei Dichtringe eingebaut, so dass zwei voneinander getrennte Ölräume entstehen. Ölräum A (Ölseite) und Ölräum B (Luftseite) sind dabei durch den mittleren, den zu untersuchenden Dichtring getrennt. Abhängig von der Füllmenge lässt sich vom Trockenlauf bis zur Ölüberflutung jeder Füllstand am Prüfstand nachbilden.

Das Optiksystm besteht aus einer Digital-Farbkamera, Tubus, Objektiv und Vorsatzlinse. Ein Prisma lenkt den Strahlengang um 90° um. An der Prismaaufnahme sind zur Ausleuchtung des Beobachtungsbereichs LED's angebracht. Diese Anordnung ermöglicht die Beobachtung der Dichtlippe durch die Glashohlwelle. Es können sowohl Einzelbilder als auch Filme digital auf einem Notebook aufgezeichnet und bearbeitet werden. Um die verschiedenen Bereiche der Dichtlippe sowohl im Ölsumpf, als

auch außerhalb untersuchen zu können, kann einerseits das Prisma um 360°, andererseits die Dichtringaufnahme mit den Dichtringen um 360° gedreht werden. Durch die Kombination der Füll-, Dreh-, Verfahr- und Zoommöglichkeiten können die Dichtringe unter allen Bedingungen in allen Positionen gut beobachtet werden.

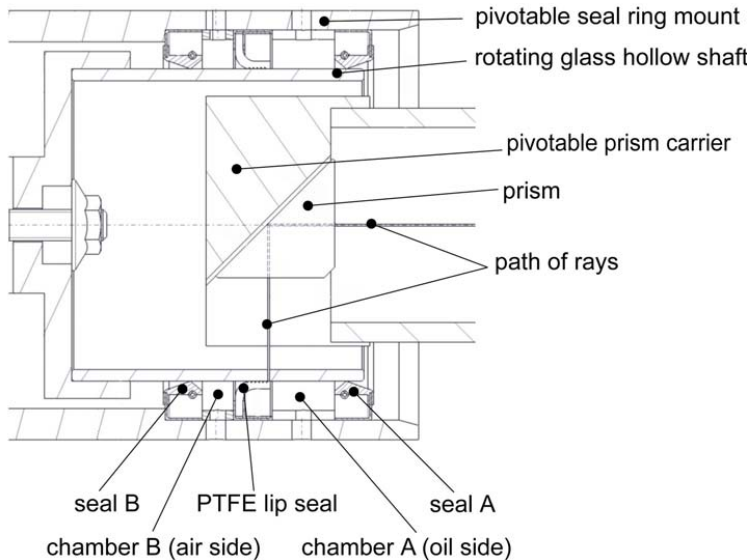


Bild 3: Prüfstand im Querschnitt
 Figure 3: Test rig cross section

4 Geometrie der PTFE-Manschettendichtung

Der Dichtring lässt sich in zwei Hauptbereiche einteilen. Der erste Bereich, die Grobgeometrie, umfasst das Gehäuse (Metallversteifungsring mit optionaler Gummiummantelung), die Anbringung der Lippe am Gehäuse und die geometrische Form der PTFE-Lippe an sich. Der Zweite ist die Feingeometrie der Spiralrinne und der Dämme selbst. In Bild 1 sind die Begriffe definiert. In /9/ und /10/ ist darauf bereits näher eingegangen.

Die Feingeometrie lässt sich wiederum in mehrere Bereiche einteilen von denen hier der Eingangs- und der anliegende Bereich diskutiert werden.

4.1 Eingangsbereich

Der stirnseitige (auf der Ölseite) Eingangsbereich der Dichtringe ist bei geschnittenen Rillen meist gut geschlossen, sodass das Öl nicht direkt in die Rinne eindringen kann. Bei geprägten Rillen ist dieser Bereich herstellungsbedingt stets weit geöffnet. Die Rillen und die Dämme laufen über den Innendurchmesser der Lippe aus. In **Bild 4**

sind die Dämme hell und die Rille dunkel dargestellt. Am Innenkreis, der nach der Montage stirnseitig in den Ölraum ragt, kann der auslaufende Damm erkannt werden. Der offene Bereich, der gesondert bezeichnet ist, ist über fast 300° am Umfang in den Ölraum geöffnet. Hier kann Öl direkt in die Rille fließen.

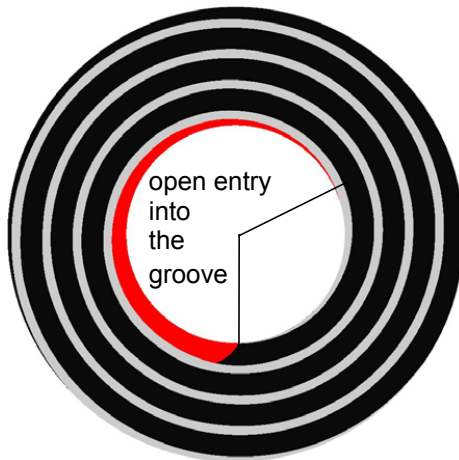


Bild 4: Offener Eingang in Rille
 Figure 4: Open entry into the groove

4.2 Anliegender Dichtlippenbereich (Berührbereich)

Bei den geschnittenen Dichtringen liegen die Dämme meist breitflächig auf. Es bilden sich durch Verzerrung der Lippe und der Dämme relativ kleine Querschnitte des Gewindegangs. Zum abhebenden Bereich, dem Übergangsbereich hin werden die Querschnitte größer.

Bei den geprägten Dichtringen berührt der ölseitig vorderste Damm die Welle nach dem offenen Eingangsbereich. Die Dämme und die Gewindegänge liegen mit der vordefinierten Geometrie über den Berührbereich an. Die Rillenquerschnitte bleiben gleich.

5 Funktionsweise

Die Funktionsweise bei drehender und stillstehender Weise unterscheidet sich erheblich. In /9/ und /10/ wurde bereits ausführlich darauf eingegangen. Im Folgenden wird die Funktion bei drehender Welle kurz beschrieben.

5.1 Funktionsweise bei drehender Welle (dynamischer Zustand)

Bei drehender Welle wird eingedrungenes bzw. bereits durchgedrungenes Öl durch die von der Welle erzeugte Schleppestromung von der Wand der Rille in Richtung Ölraum abgelenkt und somit zurückgefördert. Nach wenigen Umdrehungen sind die

Gewindgänge leer gepumpt. Auch bereits ausgetretenes aber noch anhaftendes Öl wird in die Lippe gesaugt. Auf den Dämmen, also im Berührungsbereich der Welle und des Dichtrings tritt eine Mikroströmung auf. Das dort verbliebene Öl wird weiterhin über den Umfang, den Dämmen folgend, in Richtung Ölraum gefördert. Gleichzeitig tritt eine starke Förderung von Luft in den Ölraum auf.

5.2 Funktionsweise bei stillstehender Welle (statischer Zustand)

Bei stillstehender Welle benetzt das Öl zuerst den vordersten Damm an der Ölseite. Gleichzeitig dringt Öl durch den offenen Eingangsbereich in den ersten Gewindengang ein bis dieser bis zum Ölspiegel gefüllt ist. Das Öl fließt auf den Dämmen axial und radial. Durch Kapillarkräfte getrieben fließt das Öl auch über den Ölstand hinweg nach oben um die Welle herum auf den Damm des nächsten Gewindengangs. Das Öl in den Gewindegängen folgt daraufhin dem Transport auf den Dämmen, auch über den Ölstand um die Welle herum in den nächsten Gang. Letztendlich tritt das Öl luftseitig aus.

In **Bild 5** ist das Füllen der Rille beispielhaft an einem geprägten Dichtring über dem Ölspiegel dargestellt. Im linken Bild steigt das Öl bereits auf dem zweiten Damm nach oben. Im mittleren Bild ist der zweite Damm vollständig benetzt und der linke (erste) Gewindengang wird von unten durchflutet. Im rechten Bild ist das Öl bis auf den dritten Damm und bereits zum zweiten Gewindengang durchgedrungen.

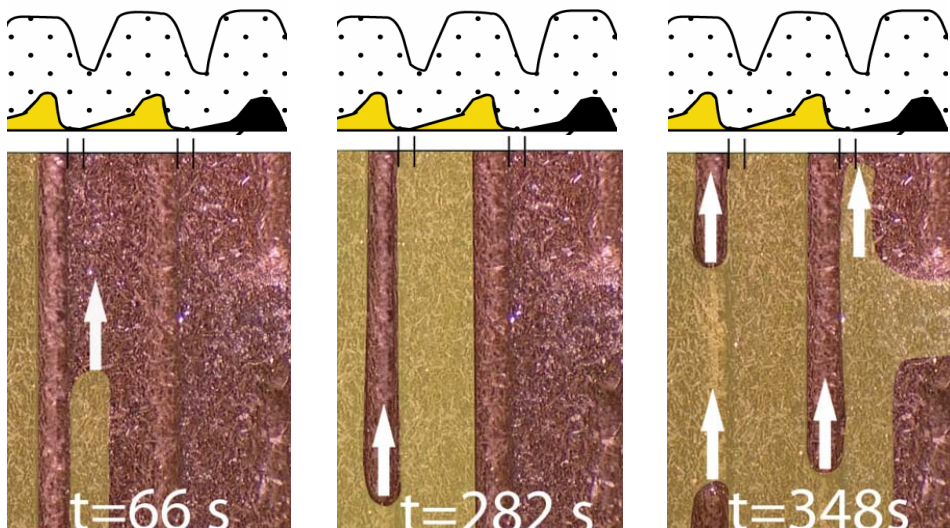


Bild 5: Benetzungs- und Strömungsverhalten
 Picture 5: Wetting- and flowbehaviour

Der Dichtsteg befindet sich zwischen dem dritten und dem vierten Damm und verschließt somit die dritte Rille. Anstatt statisch abzudichten, fließt Öl auf dem Dichtsteg in alle Richtungen, also auch axial, auf den nächsten Damm. Der Dichtsteg fungiert als Brücke zwischen den Dämmen, der das „Hindernis Rille“ übergeht. Dadurch tritt bei stillstehender Welle schneller Öl aus.

Auch bei den geschnittenen Dichtringen wandert das Öl auf dem Damm und in den Gewindegängen der Rille am Umfang entlang um die Welle herum. Gleichzeitig dringt das Öl aufgrund der großen Dammauflageflächen und damit niedriger Pressung axial durch.

5.3 Erklärung der Beobachtungen bei stillstehender Welle

Die Dämme berühren die Welle nicht vollflächig wie bei einem Elastomer-RWDR, der sich der Wellenkontur sehr gut anpasst. Vielmehr liegen nur die aus dem Matrixwerkstoff des Compounds (das PTFE) herausstehenden Füllstoffe auf der Welle auf, sodass sich zwischen dem Matrixwerkstoff und der Welle enge Spalte bilden. Das Öl dringt ein und benetzt diese Bereiche. Durch Kapillarkräfte (Energie aus der Wechselwirkung des Öls und der Oberfläche des DR im engen Spalt) fließt das Öl auch über den Ölstand hinweg nach oben um die Welle herum auf den Damm des nächsten Gewindegangs. Der Damm allein kann also ein axiales Fortschreiten des Öls nicht verhindern.

Liegen die Dämme schmal an und folgt ein Gewindegang mit steiler Wand und großem Querschnitt, bildet sich am Übergang ein Meniskus (**Bild 6**). Es wirken Kohäsionskräfte (innere Kräfte). Die Ölpartikel ziehen sich gegenseitig an. An der Oberfläche, der Grenzschicht zur Luft, resultiert daraus eine Oberflächenspannung. Diese begrenzt die Oberfläche auf ein Minimum. Um die Oberfläche zu vergrößern ist Energie notwendig. Beim Eindringen in die Rille würde sich die Oberfläche sehr schnell und sehr stark vergrößern. Dafür wäre sehr viel Energie notwendig, welche die Kapillarkraft nicht aufbringen kann.

Liegen die Dämme breit an und folgt ein Gewindegang mit flach ansteigender Wand und kleinem Querschnitt, bildet sich ebenfalls ein Meniskus mit begrenzter Oberfläche. An der flach ansteigenden Wand wird die Oberfläche beim fortschreiten des Meniskus jedoch nur langsam vergrößert. Hierfür reicht die Energie aus der Kapillarkraft aus. Das Öl wird in die Rille „gesaugt“ und die Rille komplett befüllt (**Bild 7**). Auf diese Weise wird die Lippe auch axial durchströmt. Gleichzeitig wandert das Öl auch auf dem Damm und in den Gewindegängen in Umfangsrichtung um die Welle herum.

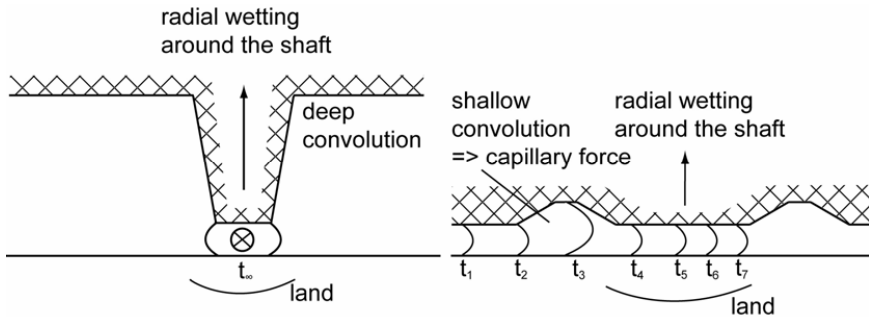


Bild 6: Benetzung tiefer Gänge
 Picture 6: Deep convolution wetting

Bild 7: Benetzung flacher Gänge
 Picture 7: Shallow convolution wetting

In **Bild 8** können diese Vorgänge nochmals anhand des bereits vorgestellten geprägten DR dargelegt werden. Zuerst benetzte das Öl den mittleren Damm radial in eine Richtung (nach oben). An der steil ansteigenden Wand links fließt kein Öl in die Rille. Hier hindert der Meniskus das Öl am übertreten in die Rille. An der flach ansteigenden Wand rechts, die wie ein flacher Spalt wirkt, fließt Öl. Dadurch wird die Rille axial gefüllt, das Öl tritt zum nächsten Damm über und benetzt diesen wiederum.

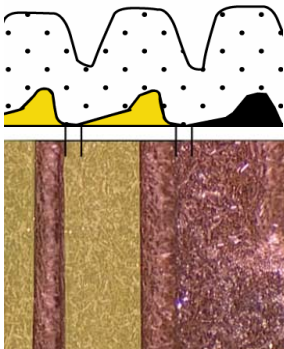


Bild 8: Benetzung an steilen und flachen Wänden
 Picture 8: Wetting at rampant and gently inclined walls

Bei den geschnittenen Dichtringen mit großer Dammauflagefläche und kleinen Rillenquerschnitten kann das Öl von einem benetzten Damm die sehr kleine Lücke, die die Rille bildet, leicht überwinden und fließt bis zum Austritt axial weiter. Die komplette Dichtlippe wirkt dabei als „enger“ Spalt, welcher durch Kapillarkräfte das Öl axial transportiert. Auch hier wandert gleichzeitig das Öl auf dem Damm radial um die Welle herum.

6 Gestaltungsvorschläge und alternative statische Abdichtung

Während allen Untersuchungen /9/ hat sich gezeigt, dass die Spirallille als Rückförderstruktur dynamisch bei günstiger Auslegung sehr gut geeignet ist. Statisch ist ein Dichtring mit Spirallille jedoch undicht. In Kap. 6.1 werden Optimierungen vorgestellt. Ein alternativer Ansatz zur statischen Abdichtung ist die Verbindung der funktionssicheren und erforschten Spirallille mit einem Element, welches das Öl am Eindringen in die Rille hindert. In Kap. 6.2 werden hierzu Gestaltungsvorschläge vorgestellt. Der Realisierung dieser Gestaltungsvorschläge stehen jedoch einige Probleme hinsichtlich des Compounds und deren Oberflächen gegenüber, die in Kap. 6.3 besprochen werden.

6.1 Gestaltungsvorschläge zur Optimierung der Spirallille

Für die funktionsgerechte Auslegung der Spirallille und zur Verbesserung des statischen Verhaltens bei Teilüberflutung lassen sich nachfolgende **Gestaltungsvorschläge** ableiten:

- Schmale Auflagefläche der Dämme
 - Möglichst wenige Dämme
 - Tiefe und breite Rillenquerschnitte mit steilen Wänden
 - Verzicht auf den Dichtsteg
- Um die lokale Pressung zu erhöhen und die Öltransportmenge in axialer und radialer Richtung im Stillstand zu minimieren.
- Um ein „überspringen“ des Öls von einem Damm auf den nächsten zu verhindern und eine langzeitfunktionssichere Spirallille (Verschleiß) zu erhalten.
- Ist die Querschnittsfläche groß genug, kann eventuell ein Transport in der Rille im statischen Zustand verhindert werden, da die Kapillarkraft nicht mehr ausreichend groß ist.
- Um axiales Übertreten über den Dichtsteg zu vermeiden.

Nach der Festlegung der Rillen- und Dammbreite, der Auswahl des Compounds und der gewünschten Radialkraft kann die notwendige Dicke und Länge der Lippe mit Hilfe einer Finite-Elemente-Analyse ermittelt werden. Daraus ergeben sich die Steigung der Rille, die Breite des Berührungsbereichs und daraus die Anzahl der anliegenden Dämme und Gewindegänge. In /9/ ist ein Vorschlag mit Zahlenwerten erläutert und erklärt.

Dabei darf die Dichtstelle nicht komplett überflutet sein. Ansonsten fließt das Öl aufgrund des hydrostatischen Drucks durch die Rille. Um auch in diesem Einsatzfall sicher abdichten zu können, muss die Spiralrille um eine alternative statische Abdichtung ergänzt werden.

6.2 Alternative statische Abdichtung

Soll der Dichtring zuverlässig im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau zum Einsatz kommen, darf kein offener Eingangsbereich der Rille im Ölsumpf liegen.

→ **Die Rille muss stirnseitig geschlossen sein.**

Der erste Damm muss dazu als geschlossener Ring ausgeführt sein, der dicht abschließt. In **Bild 9** ist dieser im Vergleich zu Bild 4 dargestellt. Dazu muss der Ring ebenso wie die Dämme schmal und mit einer hohen Pressung ausgelegt sein. Die Gestaltungsvorschläge aus Kap. 6.1 können für den geschlossenen Ring und für die Dämme direkt übernommen werden.

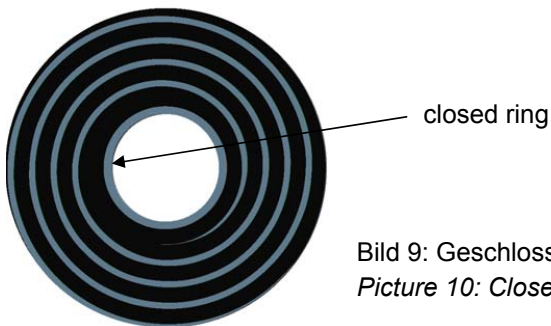


Bild 9: Geschlossener stirnseitiger Ring
Picture 10: Closed oil side ring

6.3 Problematik der Gestaltungsvorschläge

Problematisch sind jedoch die charakteristischen Eigenschaften des PTFE-Matrixwerkstoffes und seiner Füllstoffe. Es ist fertigungstechnisch schwierig eine für fluide „dichte“ Fläche, wie dies beispielsweise beim Elastomer-RWDR möglich ist, herzustellen.

Bild 10 verdeutlicht die Erkenntnisse mit einer Beobachtung unter der Glashohlwelle. Im oberen Bereich ist der erste Damm auf der Ölseite einer teilweise verschlissenen Lippe nach Dauerlauf zu sehen. Die dunklere (braune) Oberfläche ist herstellungsbedingt gegeben. Die hellen, weißen Bereiche sind das PTFE mit Glasfasern. Es ist zu erkennen, dass dieser Damm nicht durchgängig angeschliffen ist. Die braunen Bereiche hatten während des Dauerlaufs keinen Kontakt zur Welle und wurden nicht verschliffen. An diesen Stellen tritt im Stillstand Öl durch.

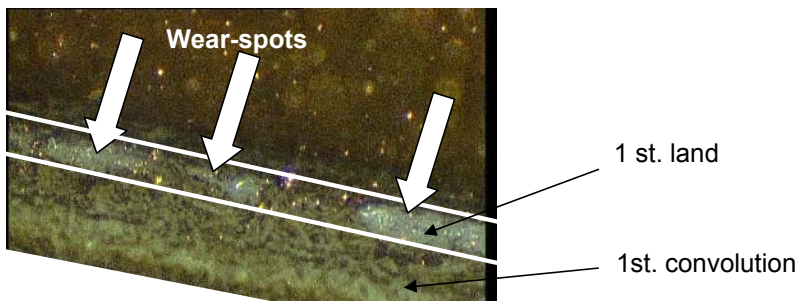


Bild 10: Erster Damm mit Verschleißstellen
 Picture 10: First Land with wear-spots

→ Um statisch sicher abzudichten, muss insbesondere der stirnseitig geschlossene Ring derart ausgebildet sein, dass er eine schmale Berührfläche mit hoher und in Umfangsrichtung gleichmäßiger Pressung erreicht. Dadurch liegt er gleichmäßig auf und hindert das Öl am Eindringen im statischen Zustand. Dringt, wie in Bild 10, trotzdem Öl durch den geschlossenen Ring, ist die Menge auf jeden Fall wesentlich geringer, als wenn das Öl durch den offenen Eingangsbereich direkt in die Rille fließt.

6.4 Zusammenfassung der Gestaltungsvorschläge

Mit

- schmalen Dämmen und
- einem stirnseitig geschlossenen Damm (Ring) und
- relativ tiefen, breiten und steil ansteigenden Rillenquerschnitten
- bei angepasster Radialkraft

können Manschettendichtringe aus PTFE-Compounds mit günstigen dichtungstechnischen Eigenschaften für den allgemeinen Maschinen und Anlagenbau geschaffen werden.

7 Analyse optimierter Dichtringe

Dichtringe die alle Gestaltungsvorschläge in sich vereinen standen bisher noch nicht zur Verfügung. Dichtringe bei denen die Vorschläge teilweise verwirklicht sind, konnten jedoch bereits analysiert werden.

Ein Dichtring hat schmale Dämme und fast senkrecht ansteigende Wände. Es kann deutlich erkannt werden, wie das Öl rein auf den Dämmen um die Welle fortschreitet. Das Öl kann am Übergang zur steilen Wand auf dem Damm gehalten werden und fließt nicht in die Rille. Durch die schmalen Dämme ist dieser „Volumenstrom“ wesentlich kleiner, als bei allen anderen bisher untersuchten.

Bei einem zweiten Dichtring ist der erste Damm als geschlossener Ring ausgebildet. Aufgrund der in Kap. 6.3 vorgestellten Problematiken der rauen Oberflächen, dringt auch hier Öl axial ein. Diese Menge ist aber im Vergleich zum Eindringvolumen bei einer geöffneten Rille nahezu vernachlässigbar klein. Der Ring verhindert nahezu vollständig das Eindringen von Öl.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Forschungen erfolgte die Analyse der Geometrie und der Funktionsweise der unterschiedlichen am Markt erhältlichen PTFE-Manschettendichtringe. Ein Hauptbestandteil der Analyse war die visuelle Beobachtung der Strömungsvorgänge in den Rillen und auf den Dämmen der Dichtlippe (im Kontaktbereich zur Welle). Die Kernergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In günstig gestalteten Rillen wird das Öl im dynamischen Zustand durch die Rillen zurückgepumpt. Bei drehender Welle sind die Rillen weitgehend leer und Luft wird von außen in das System gefördert.
- Alle Dichtringe mit Spirallille sind bei anstehendem Öl statisch undicht. In günstig gestalteten Rillen, fließt das Öl auf den Dämmen und in den Gewindegängen um die Welle herum. Das Öl fließt dabei auch über dem Ölspiegel nach oben.
- Der Dichtsteg wirkt als Störstelle.

Auf Basis dieser Ergebnisse und Erkenntnisse wurden Gestaltungsvorschläge erstellt, die einen Einsatz im Allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau bei überfluteten Dichtstellen funktionssicher erlauben könnten. Die Untersuchung zweier neuerer Dichtringe bestätigten die Gestaltungsvorschläge. Werden diese konsequent umgesetzt, ist eine deutliche Verbesserung zu den momentan erhältlichen DR möglich. Weiterhin werden optimierte Dichtringe analysiert und die Ergebnisse im Rahmen einer Dissertation veröffentlicht.

9 Literaturverzeichnis

- /1/ Müller, H. K.: Dichtungstechnik - Abdichtung bewegter Maschinenteile. Weinheim, 2002
- /2/ Müller, H. K.; Nau, B. S.: www.fachwissen-dichtungstechnik.de.
- /3/ Kammüller, M.: Zum Abdichtverhalten von Radialwellendichtringen. Dissertation 1986, Universität Stuttgart, Institutsbericht Nr. 20.
- /4/ Müller, H. K., Jenisch, B.: Radialwellendichtringe II. Vorhaben Nr. 103; Dichtmechanismen von Radialwellendichtringen; Abschlußbericht. hrsg. vom Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. – Frankfurt: FKM, 1989.
- /5/ Müller, H.K.; Hoffmann, C.: Wellendichtringe für höhere Betriebsanforderungen, FKM-Bericht Nr. 165

- /6/ Bauer, F., Haas, W.: A new approach to analyze the hydrodynamic flow in sealing aids – PTFE-lip seals with spiral grooves, STLE Annual Meeting, Las Vegas, USA, May 15-19, 2005
- /7/ Bauer, F., Haas, W.: PTFE lip seals with spiral groove – The penetration behaviour, hydrodynamic flow and back pumping mechanisms, BHR-Group, 18th Int. Conference on Fluid Sealing, Antwerp, Belgium: 12 - 14 Oct. 2005
- /8/ Bauer, F.; Haas, W: Moderne Untersuchungsmethoden für Radialwellendicht-
ringe am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille, Dichtung-
technik Jahrbuch 2006, Hüthig-Verlag
- /9/ Bauer, F.; Haas, W.: PTFE-Manschettendichtung mit Spiralrille - Funktionswei-
se und Alternativen. FKM-Forschungsheft 291, Frankfurt/Main 2006
- /10/ Bauer, F.; Haas, W.: PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Funktions-
und Wirkungsweise. VI. Hamburger Dichtungstechnisches Kolloquium: Dyna-
mische Dichtungen. 08. / 09. Juni 2006.